

[19]中华人民共和国国家知识产权局

[51]Int. Cl<sup>7</sup>

B01D 65/10

B01D 63/02

## [12]发明专利说明书

[21] ZL 专利号 94106268.6

[45]授权公告日 2000年3月29日

[11]授权公告号 CN 1050770C

[22]申请日 1994.5.27 [24]颁证日 1999.12.24

[21]申请号 94106268.6

[30]优先权

[32]1993.6.1 [33]IL [31]105875

[73]专利权人 罗坦工业有限公司

地址 以色列比尔-雪瓦

共同专利权人 阿加公司

[72]发明人 A·索弗 S·沙格 D·戈卢布

H·科恩 M·阿扎赖亚

[56]参考文献

US4170695A 1979.10.9 HD1M6/20

US4226921A 1980.10.7 HD1M2/14

US4248648 1981.2.3 B32B35/00

US5221388 1993.6.22 B32B35/00

审查员 晏杰

[74]专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

代理人 魏金玺 田舍人

权利要求书2页 说明书13页 附图页数5页

[54]发明名称 破损纤维的选择性堵塞

[57]摘要

选择性堵塞模组件的破损中空纤维的方法,所述纤维与众多的未破损纤维排列成壳-腔形式,该方法包括下列步骤:

(i)将组件垂直放置并使机组件末端与液体密封剂接触;

(ii)使液体密封剂上升进入破损纤维至高于破损的高度;

(iii)让密封剂至少部分固孔;

(iv)切除一段纤维束,其高度应使未破损纤维空腔暴露而破损纤维保持堵塞。

ISSN 1000-4274

## 权 利 要 求 书

1. 选择性堵塞膜组件的破损中空纤维的方法, 该纤维包括排列成壳-腔形式的纤维堆或纤维束, 所述纤维堆或纤维束包括破损纤维与众多的未破损纤维, 该方法包括下列步骤:

i. 在一堆或一束纤维的一端将纤维的全部空腔堵塞;

ii. 将膜组件的壳侧和空腔侧抽成基本上真空;

iii. 将不可穿透气体填入壳侧和空腔侧;

iv. 随后, 将膜组件垂直放置, 将膜组件的空腔侧与不可穿透气体供料分开, 将膜组件的与堵塞端相对的另一端浸入装有液体密封剂的贮槽中;

v. 将壳侧减压足够长时间, 通过破损纤维的真空空腔使密封剂被抽吸到破损纤维的空腔中;

vi. 使密封剂至少部分固化以堵塞破损和未破损纤维的空腔; 以及

vii. 切除一段纤维堆或纤维束, 其高度应使未破损纤维空腔暴露而破损纤维空腔以密封剂使其保持堵塞。

2. 根据权利要求 1 的选择性堵塞膜组件的破损中空纤维的方法, 该纤维包括排列成壳-腔形式的纤维堆或纤维束, 所述纤维堆或纤维束包括破损纤维与众多的未破损纤维, 该方法包括下列步骤:

i. 在一堆或一束纤维的一端将纤维的全部空腔堵塞;

ii. 将膜组件的壳侧和空腔侧抽成基本上真空;

iii. 将不可穿透气体填入壳侧和空腔侧;

iv. 随后, 将膜组件垂直放置, 将膜组件的空腔侧与不可穿透气体供料分开, 将组件的与堵塞端相对的另一端浸入装有液体密封剂的贮槽中;

v. 将壳侧减压足够长时间, 通过破损纤维的真空空腔侧使液体密封剂被抽吸到破损纤维的空腔中;



vi. 将可穿透气体填入壳侧，使可穿透气体穿入空腔侧，以便从未破损纤维中排除密封剂，从而使其敞开未破损纤维的空腔；并使密封剂固化以堵塞破损纤维的空腔。

3. 根据权利要求 2 的方法，该方法还包括使密封剂增稠，但不固化的步骤。

4. 根据权利要求 2 的方法，其中液体密封剂是高粘度、慢固化密封剂在至少 3 厘米水柱的压力差  $D_p$  下施用到内径至少为  $10\mu$  的破损纤维上至少 0.1 分钟，直至达到至少 5mm 的穿透深度。

5. 根据权利要求 2 的方法，其中液体密封剂是高粘度、慢固化密封剂在至少 3 厘米水柱的压力差  $D_p$  下施用到内径至少为  $10\mu$  的破损纤维上至少 0.1 分钟，直至达到至少 5mm 的穿透深度。

6. 根据权利要求 1 的方法，其中液体密封剂是低粘度密封剂在不施加压力差的情况下施用于内径至少为  $20\mu$  的破损纤维一段时间，使得通过毛细管上升达到 0.5-10cm 范围的期望的穿透深度。

7. 根据权利要求 1 的方法，其中液体密封剂是使膜组件在不可穿透物中预先暴露足够长的时间，以填充空腔和进料侧，然后让密封剂填充组件的底部并在其中借助于毛细作用上升，从而将不可穿透气体排出破损纤维，并在其中上升到高于未破损的不可穿透气体填充纤维的高度。

8. 根据权利要求 7 的方法，其中不可穿透气体是六氟化硫。

9. 根据权利要求 1 的方法，该方法还包括通过将膜组件浸入液体胶粘剂的罐装步骤。

10. 根据权利要求 1 的方法，该方法还包括对膜组件的另一端重复进行相同的步骤。

11. 根据权利要求 2 的方法，该方法还包括对膜组件的另一端重复进行相同的步骤。

## 说 明 书

### 破损纤维的选择性堵塞

本发明涉及中空纤维膜领域，更具体地说，本发明涉及通过选择性堵塞制造过程中破损的膜来修复中空纤维膜组件的方法。

膜分离法是基于使物质通过膜壁以选择性分离不同物质这一原理的物质分离方法。

膜是一种表面积很大的薄层固体。其用途之一是用作为从混合物中分离出两种或多种物质成分的工具。膜的分离性能是基于其对各种物质成分的不同的穿透性的。因而，为了进行分离，必须有一通过膜的驱动力，它促使材料穿过膜，它可以是压差或浓度差。

当以压差作为驱动力时，膜必须具有承受压差所必须的机械强度。这与膜必须尽可能薄以便有较大流通量的要求相矛盾。因此，将膜附在相对多孔性的载体上，它一方面支承机械载荷，另一方面又允许物质自由流通其大孔体系。

人们对于薄层膜、在给定的膜分离器体积中的大表面积和多孔性机械载体的需求导致了中空纤维膜的开发。它们是圆形截面的薄壁管。这样，它们是自承重的并且每单元表面积占的体积很小。分离所用的中空纤维组件大多设计成壳与管的组合，见图1所示。在这样排列时，可以分别接近中空纤维(HF)膜的里面(空腔)和外面(壳)，从而能够分离三个主要物质流：进料，排挤物(它在组件的另一面收集，但却在与进料引入的膜表面是同一表面收集)和穿透物(它是穿过膜的物质流的结果)。

一束中空纤维膜当排成壳-管结构用于分离目的时，可能包含几根破裂或针孔纤维。见图2中数字1所示的破裂纤维。通过这些缺损处

的物质传递是非选择性的并且与其它设计用来获得所需选择性的膜壁相比传递量很大。因此，这样的缺损破坏膜束的分离性能。如果这种缺损很多的话将使其失效。因此很明显，为了利用包含破损纤维的纤维束，必须找到一种能够修复或避免这些缺损或者能够排除其不良结果的方法。

避免这种缺损的明显的方法是改进膜生产过程中的各步骤。但是，工业规模的纺制中空纤维总是有一定程度的缺损。对于其有很薄并因而易损的皮层的不对称膜，很容易出现不同直径的针孔。事实上，中空纤维皮层薄的极限由缺损的形成来确定。

其它膜针孔的形成的出现不是在膜生产过程中产生的，而是在随后的操作和处理过程中产生的。在脆性很大的膜中针孔特别多，例如陶瓷和碳膜以及刚性玻璃态聚合物的情况便是如此。在这种情况下，纺丝系统制得的中空纤维可能不存在缺损。但施以机械应力的进一步操作可能引起损伤，例如筒管缠绕和退绕、切成一定长度的纤维、将中空纤维插入管中和最终装罐。

为解决上述问题，提供了多种修补中空纤维缺损方法。在美国专利第4,230,463号(Henis等人)中，用硅橡胶层覆盖用于气体分离的中空纤维，硅橡胶层堵塞缺损，但由于其透气性高，故并不明显妨碍气体通过膜。涂层聚合物以在挥发性溶剂(如戊烷)中的溶液的形式施用，并在空腔侧抽真空。用这种方法将聚合物溶液挤入缺损并确保其堵塞。

或者，将聚合物涂层溶液引入中空纤维的空腔侧而活性皮层在壳侧，从而，溶液到达膜外侧时便干燥，由于溶剂蒸发而在针孔往壳侧的开口处选择性地形成聚合物堵塞。

上述先有技术方法可用来处理不超过1微米(可能更小)的缺损，但不适用于断裂纤维的处理。

另一种避免缺损膜的方法是分别探测和排除。如果手工进行，由于太费时间而在工业上是不可能的。

本发明的目的之一是提供一种能够在罐装成一束之后选择性地消除破损纤维的方法。术语“破损纤维”是指断裂、带针孔和损伤等的中空纤维。这些缺损通常存在进料侧与透过物侧的自由通道，使其上能产生选择性的流通。

本发明的目的是之二是提供一种能够使用因机械损伤而失去选择性的膜组件的简单而经济的方法。

本发明的目的之三是提供一种这样的方法：通过该方法能够以工业上可接受的生产率制造中空纤维束，而且，该方法可以免除对纤维的机械断裂进行人工检查和修整。

本发明的目的是之四是提供一种这样的方法：通过该方法能够从完好的纤维中区分出破损纤维，它是选择性消除破损纤维而不必从整个纤维束中单独地将其去除的工具。

本发明的选择性堵塞组件的破损中空纤维的方法中，所述纤维与众多的非破损纤维排列成能分别接近中空纤维的壳侧和空腔侧的形式。该方法包括下列步骤：

- (i) 将组件垂直放置并使组件末端与液体密封剂接触；
- (ii) 使液体密封剂上升进入破损纤维至高于破损的高度；
- (iii) 让密封剂至少部分固化；
- (iv) 切除一段纤维束，其高度应使未破损纤维空腔暴露而破损纤维保持堵塞。

本发明优选的实施方案包括下列步骤：

1. 将一堆或一束纤维的一端空腔全都堵塞；
2. 将组件的壳侧和空腔侧抽成基本上真空；
3. 将不可穿透流体填入壳侧和空腔侧；

4. 将组件垂直放置，将组件的空腔侧与不可穿透流体供料分开，将组件的与堵塞端相对的另一端浸入装有液体密封剂的贮槽中；

5. 将壳侧减压足够长时间，通过破损纤维的真空空腔侧使密封剂被抽吸到破损纤维的空腔中；

6. 让密封剂至少部分固化；

7. 切除一段纤维束，其高度应使未破损纤维空腔暴露而破损纤维保持堵塞；

8. 必要时，在组件的另一端重复上述步骤。

此外所用的术语“真空”是指负压，根据情况可以包括部分或完全真空。

值得注意的是在上述步骤5中，密封剂进入破损纤维比进入空腔不是真空的完好纤维深得多。此外，步骤8一般在空腔侧的中空纤维的两端都可接近的情况下采取。

本发明的另一个优选的实施方案包括下列步骤：

I. 将一堆或一束纤维的一端空腔全都堵塞；

II. 将壳侧和空腔侧抽成基本上真空；

III. 将不可穿透液体填入壳侧和空腔侧；

IV. 将组件垂直放置，将组件的空腔侧与不可穿透流体供料分开，将组件的与堵塞端相对的另一端浸入装有液体密封剂的贮槽中；

V. 将壳侧减压足够长时间，通过破损纤维的真空空腔侧使密封剂被抽吸到破损纤维的空腔中；

VI. 让密封剂部分固化（可选步骤）；

VII. 将可穿透流体填入壳侧，使可穿透流体穿入空腔侧，以便从未破损纤维中排除密封剂；

VIII. 切除一段纤维束，其高度应使未破损纤维空腔暴露而破损纤维保持堵塞；

IX必要时，在组件的另一端重复上述步骤。

用于区分破损纤维和完好纤维的选择性消除的性质是在破损纤维的空腔侧和壳侧之间的非选择性流体传递。

选择性消除包括胶粘剂（密封剂）进入破损纤维的空腔并在其中固化，从而将其堵塞，避免了通过纤维的非选择性传递。

图1至图5示出SCFF法的各步骤；

图6至图9示出了自动SCFF法；

图10示出了在SCFF过程中的压降。

本发明的一个优选的实施方法示于图1至6。

在图1和图2中示出了罐装法的两种典型的方法。在图1中，装罐是通过将膜组件浸入液体密封剂中从而堵塞空腔末端而进行的。在图2中，装罐是通过将液体、粘性密封剂从旁边施用在组件管末端，而HF束伸出来，从而让HF末端敞开。在SCFF开始时，HF束必须置于图3A的位置，也就是说，HF束的一端敞开而另一端关闭（图3B）。在所有的图中，为简单起见只画出了四根中空纤维，它代表一束多得多的纤维。在该图及随后的某些图中，画出一根破裂的纤维，用数字1表示，另一个是带针孔的，用数字2表示，它们用来一般性表示破损纤维。

组件末端通过将组件浸入液体胶粘剂（一般地表示为3和3'）中装罐，胶粘剂用任何已知技术固化，如放置一段时间或其它方法如接触催化或热固化。用该浸渍方法，胶粘剂将很可能在一定深度（几毫米）上穿透进入所有中空纤维空腔并将其堵塞，然后可切断堵塞部分将纤维打开，如图3的4所示。如果没有破损纤维的话，则4代表待装入分离系统的基本HF膜组件。

在一个稍有不同的方法中，装罐是通过将胶粘剂施用于在管子末端附近的纤维束边上（图2）从而产生胶粘剂薄层5和5'来进行的，而不是如图1那样将整个组件末端浸入（经常使整体组件沿其轴转动直

至胶粘剂固化，以便将胶粘剂布满管子)。用图2所示的方法，让HF的空腔端敞开。

### 实施例1

#### 仅用真空处理来选择性堵塞破损纤维

为了能按本发明操作，在组件的最末端必须有一段中空纤维束“尾巴”从组件管中伸出。如图1至5所示。

另一端(未处理的)HF的空腔应各自是堵塞的，这很重要。这就表明，如果基本罐装法是在一侧施用胶粘剂的话(图2)，那么在未处理侧的空腔端应全部封闭，如图3B中的6。相反，如果两端均封闭，则由于前已述及在最末端有一段长出来的纤维。因此可以切断封闭端，从而打开一端。

获得上述详情之后，将组件的壳侧7和空腔8与真空管线连接，以除去任何存在的流体(图3A)。然后，将不可穿透物引入空腔侧和壳侧，直至环境压力。所谓“不可穿透物”是指不能穿透无缺损膜壁的流体。

将组件垂直放置。将空腔侧与不可穿透流体供料隔开，立即浸入液体密封剂9中，如图4所示。然后将壳侧7与抽真空管线相连预定时间 $t$ ，将该侧压力降至低于空腔侧压力(空腔侧在环境压力下)的值 $D_p$ ，然后，在壳侧引入不可穿透物解除负压。应选择预定时间 $t$ ，使其与空腔直径、真空度(如果是部分真空的话)、密封剂粘度及其随时间的增大(固化过程)一起使进入破损纤维的穿透深度合乎需要。在抽真空时，胶粘剂只进入破损纤维的空腔中，这是由于压力差 $D_p$ 通过破损纤维从壳侧到空腔侧的泄漏而传递。这通过胶粘剂在图4中数字10和11表示的两根破损纤维中上升得到说明。

因为填入未破损HF的不可穿透物不能用泵通过膜壁抽出，所以从表面上看密封剂不可能穿透进入未破损HF。实际上，由于与密封剂接

触，将会因为毛细作用而发生密封剂渗透进入未破损膜，但进入的很浅，如图4的12所示。密封剂渗透进入缺损纤维空腔的高度通过可控参数如预定抽真空时间、压力差 $D_p$ 和密封剂粘度来确定。

在HF空腔中建立密封之后，在大约点13（图4）处切除纤维束的尾巴，其长度应能除去在未破损纤维末端形成的浅密封，但并不沿纤维的破损形成更深的密封。

图5示出的所得纤维束选择性地堵塞了破损纤维，这可通过与图3A的未处理纤维束相比较而看出。

如果制成的组件是在空腔侧一侧具有盲端的类型，那么处理在进行到图5所示的步骤之后终止就足够了。但是，如果想要空腔两侧都敞开，则必须推切尾步骤。将组件翻过来头朝下，将组件的另一端浸入密封剂浴中，抽真空，以堵塞对应于已堵塞了一端的破损纤维的另一端，最后如上述那样切除两头的尾巴。

### 实施例2

#### 真空-加压处理来选择性堵塞破损纤维

通过如上所述引入不可穿透物来解除负压以及随后的切尾步骤的一个重要的替代方法是在壳侧引入可穿透物来解除负压。在这种情况下，可穿透物扩散进入空腔边，将空腔中的压力升高到环境压力。在未破损纤维中，压力的增大将密封剂从纤维末端推出；而对于破损纤维，扩散可穿透物通过缺损（针孔或裂缝）流回壳侧，从而它不能在纤维中施加压力。通过正确选择用可穿透物解除负压的时间，可使胶粘剂适度稠化，该过程可调节使得仅打开未破损纤维而不打开破损纤维的浅密封。

本发明的这一实施方案在没有“尾”端的工作组件的修补中特别重要，如实施例1所述，这是由于可穿透物的反向扩散不需要切尾。这也大大简化了膜组件的设计，因为没必要对尾要素和尾切除作出规定

。用该方法获得的情况如图5所示，其中在壳侧引入可穿透物形成空腔过压，而两个未破损末端14中的密封剂被空腔过压清除。

### 密封剂的选择

用于选择性堵塞破损纤维(SCFF)目的的密封剂应当优选非收缩型的。因此，通过溶剂蒸发而固化的密封剂是不太适宜的。因此，优选的材料是那些可催化固化或热固化或两者兼可的材料，例如环氧树脂、丙烯酸树脂、硅氧烷、酚醛树脂和糠醇等。粘度是决定密封剂穿透进入破损纤维深度的重要参数，根据粘度可将这些材料分成高粘度类和低粘度类。

部分聚合的具有蜂蜜状稠度的胶粘剂属于第一类，例如环氧树脂和某些硅氧烷。这类胶粘剂的粘度在数百到数万厘泊之间。粘度在0.3—3厘泊范围内的单体液体属于第二类，例如酚醛树脂和糠醇。

注意到有介于这两类之间的情况，这两类材料的粘度数值可跨越3-4个数量级。因此必须在SCFF处理中采用两种施用密封剂的通用方法，这取决于密封剂的粘度是高还是低。

还应当注意的是，本发明并不限于使用任何特定类型的纤维，它可采用碳膜，也可采用玻璃膜、陶瓷膜或聚合物膜。专业人员在选择用于给定膜SCFF的最适合的密封剂时会将结构材料考虑进去。

### 过程参数分析和控制

在本节中，将给出SCFF参数的简要的定量分析。提出该分析是为了更好地理解本文要求保护的方法的不同变化。

必需控制的最重要的参数是密封剂穿透进入破损纤维的深度。浅穿透使得难以确定尾切除的具体位置(它必须位于密封剂穿透进入完好的纤维的深度以上，同时位于密封剂穿透进入破损纤维的深度以下)。另一方面，也不允许太深的穿透：

1. 如果膜的缺损处接近SCFF处理的组件末端。在此情况下，穿透

的密封剂可从缺损处冒出到组件的壳侧，将许多纤维粘在一起，以多种方式干扰组件的功能。

2. 如果较后才对组件进行热处理，由于通常是有机聚合物的密封剂化合物可能热解并且发出的烟雾可能引起堵塞纤维爆裂并严重污染整个膜组件。这样一系列事件可能与膜（如碳膜、陶瓷膜和基于聚磷嗪（polyphosphazene）的热稳定性有关。这样的膜可能必须经热处理以除去降低穿透性的杂质，或者可用于高温分离过程。

决定密封剂穿透深度（PD）的因素源自层状粘性流动的因素，该因素决定密封剂进入纤维空腔的流速，这些因素是：

1. 在密封剂吸入破损纤维空腔时产生的空腔与壳侧的压力差 $D_p$ 。该压力差提供密封剂穿透进入破损纤维的驱动力。
2. 抽真空时间的长短。
3. 液体密封剂粘度。显然，当其它条件相同时，粘度越低，穿透深度越深。
4. 破损纤维的缺损点的泄漏尺寸，如图10所示。

在SCFF过程中，外加压力差 $D_p$ 分为三个部分： $D_{p1}$ ，它落在缺损点的泄漏上，轴向压降 $D_{pa}$ ，它是沿泄漏与穿透密封剂表面之间的距离 $l$ 的不可穿透的粘性流动的结果，和 $D_{ps}$ ，这是密封剂穿透的驱动力。在图10中，数安16表示中空纤维，数字17是纤维的盲端，数字18是壳室，19是抽真空管线，20是密封剂池。

因此，我们可得到：

$$D_p = D_{p1} + D_{pa} + D_{ps} \quad (1)$$

5. 如上所述，距离 $l$ 决定轴向压降 $D_{pa}$ 的大小。如果不可穿透物的粘度远远低于密封剂的粘度，则可忽略该压降。当不可穿透物是粘度数值至少比液体（密封料）为粘度数值低3个数量级的气体时，便可能出现这种情况。在另一种情况下，液体密封剂可以是高粘度的（2000

厘泊以上)，如环氧树脂，而不可穿透物可以是粘度为0.3-3厘泊的常用液体。

根据上述论点，我们在下文中将假设第5号因素，即轴向压降，可被忽略。

密封剂流动进入中空纤维(HF)的基本方程服从泊松方程：

$$F = \pi D_p r^4 / (8 \times \eta) \quad (2)$$

其中F是以 $\text{cm}^3/\text{秒}$ 表示的密封剂进入HF的流速，r是以cm表示的HF内径，设其截面为圆形； $\eta$ 是密封剂在任一瞬间的穿透深度， $\eta$ 是以达因·秒/厘米<sup>2</sup>(泊)表示的粘度。

用管截面积 $\pi r^2$ 除以F并整理，得到平均轴向液体速度 $dx/dt$ 。从而：

$$dx/dt = r^2 D_p / (8 \eta x) \quad (3)$$

在下文中，处理的描述将分为3种方法，两种用于高粘度密封剂，第三种用于低粘度密封剂。

#### (1) 高粘度，慢固化密封剂

根据方程(2)-(3)，我们容易得到：

$$x = [2r^2 D_p t / (8 \eta)]^{1/2} \quad (4)$$

从方程我们发现，例如，若穿透深度(PD)为5厘米，高粘度密封剂的粘度为3000厘泊(第1类)，HF内径为100微米(0.01cm)， $D_p=1$ 巴(厘米克秒制为106达因/平方厘米)，则根据方程4c，穿透时间为 $5^2 \times 8 \times 30 / (2 \times 10^{-4} \times 10^6) = 30$ 秒。该穿透时间落在实践中合理的范围内。时间越短越难控制，时间较长将使催化固化胶粘剂(环氧树脂

脂) 变得很粘, 以致不能以期望的深度进入纤维空腔。

因此, 在本发明的一个实施方案中, 将高粘度、慢固化密封剂在至少3厘米水柱的压力差 $D_p$ 下施用到内径至少为 $10\mu$ 的破损中空纤维上至少0.1分钟, 直至达到至少5mm的穿透深度。

#### (b) 高粘度、快固化密封剂

人们可以利用固化胶粘剂获得所需的穿透深度范围, 而与驱动力 $D_p$ 的施加时间无关。显然, 采用适当和压降的给定粘度范围的新制备的快固化胶粘剂, 有可能超长时间地施加压降, 直到胶粘剂因固化而停止沿膜腔的流动。这便大大简化了该过程。

因而, 在本发明的另一优选的实施方案中, 将高粘度、快固化密封剂在至少0.01巴的压力差下施用于内径至少为 $10\mu$ 的破损纤维一段时间, 使得达到期望的至少5mm的穿透深度。

#### (c) 低粘度密封剂

根据方程(4), 在1巴的压力差下, 低粘度密封剂将在数秒的合理时间内穿透太深。从而, 对于1厘泊的粘度, 30秒的穿透时间和5cm的PD, 驱动压力 $D_p$ 根据方程4应不超过几厘米水柱。该数值与垂直放置的HF束的毛细管上升和重力压头值相差不大。因而, 对于低粘度密封剂, 毛细管上升为SCFF提供驱动压力差 $D_p$ , 导致简化的方法, 不必从外部抽真空。

本方法优于强制高(1巴左右) $D_p$ 最重要之处在于如果HF垂直放置, 本方法能确定PD的渐近极限。

对于本领域技术人员来说, 显然极限毛细管上升 $X(=PD)$ 将正好平衡毛细力, 即:

$$gdx = D_p = 2g \cos \alpha / r \quad (5)$$

其中 $g$ 是重力加速度( $981$ 达因 $\cdot$ 秒 $^{-2}$ ),  $d$ 是密封剂密度( $g/cm^3$ )。

从该方法可以估算出, 对于一组典型数据 $r=100$ 微米, 表面张力

30 达因/厘米，这对许多有机液体来讲是代表性的，接触角  $\alpha = 0$ ，密封剂密度 1 克/厘米<sup>3</sup>，则  $D_p$  约为 6 cm。

以这种方式应用 SCFF 时，知道密封剂的时间常数  $T$  很重要。对方程 (5) 的分析表明

$$T = 12.8 h g / (r^3 d^2 g^2) \quad (6)$$

这表明，与强制驱动压力（方程 4c）方法不同，在毛细驱动压力方法中，穿透时间与 HF 空腔半径的三次方成反比。对于许多有机液体的典型值  $r = 100$  微米， $h = 1$  厘泊， $g = 30$  达因/厘米，我们得到  $T$  的真实值：

$$T = 12.8 \times .01 \times 30 / (.01^3 / 1 / 1000^2) = 3.8 \text{ 秒}.$$

因而，根据本发明的另一优选的实施方案，将低粘度密封剂在不施加压力差的情况下施用于内径至少为  $50 \mu$  的破损纤维一段时间，使得通过毛细管上升达到 0.5-3 cm 范围的期望的穿透深度。

### 实施例 3

#### 自动 SCFF

自动 SCFF 是在装罐过程中整体进行的 SCFF 操作。它与常规装罐的主要区别是将组件在不可穿透物中预先暴露足够长时间，使空腔侧和进料侧充满不可穿透物，如图 6 和 7 所示。在图 6 中可见到碳膜。选择  $\text{SF}_6$ （六氟化硫）作为不可穿透物，它从 T 形接口往下流动，使之充满组件的底面（ $\text{SF}_6$  比空气重得多，因而有往下流动的趋势）。在图 7 中，密封剂容器 15 的底面接口关闭，它在第一阶段是打开的（图 6）， $\text{SF}_6$  沿组件向上流动填充其上部。

在图 8 中，将容器 15 的木塞取掉，向里面倒入密封剂。在图 9 中，

可以看出，密封剂的位置应使得如果注入正确量的密封剂，则它将因虹吸效应和重力而填充组件的底壳面直到期望的高度。进入空腔的填充高度由于它能通过断裂/针孔开口将不可穿透物排斥到壳侧而能上升进入破损纤维(由于毛细作用而比壳侧高)。进入未破损纤维的穿透深度只是一部分。

固化后，按照常规方法切除正确长度的组件尾部。如前述SCFF方式一样，如果期望有两个空腔进料接口，则在组件的另一端重复这一处理。

本领域技术人员应该明白，本发明方法可用来修复各种缺损，并不局限于具体的材料，密封剂和束外形。可在不超过本发明范围的情况下对所用方法进行许多改变。

# 说明书附图

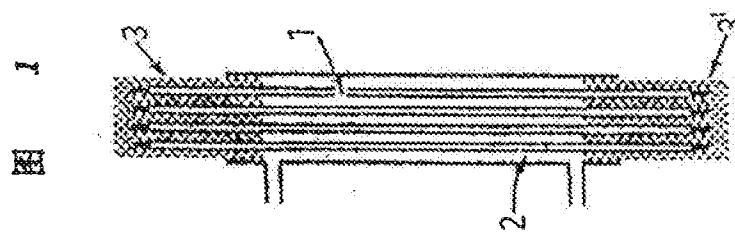
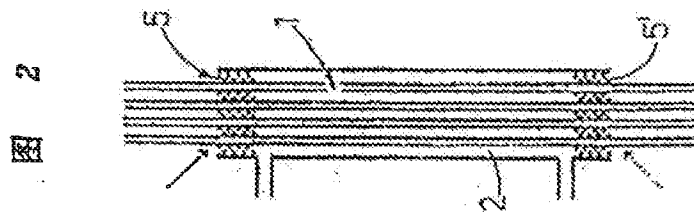
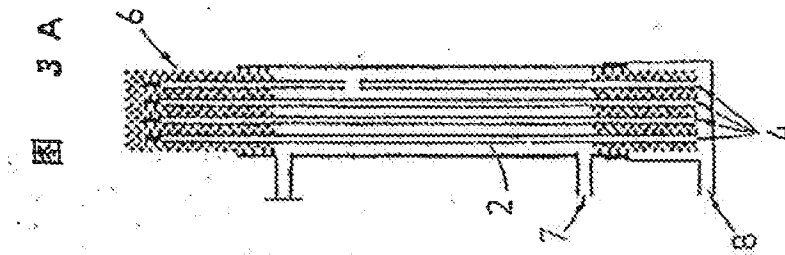


图 3 B



图 4

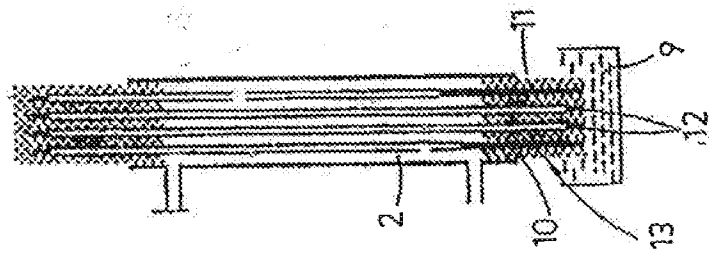
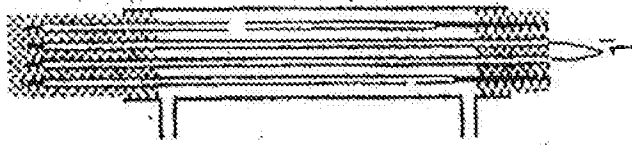
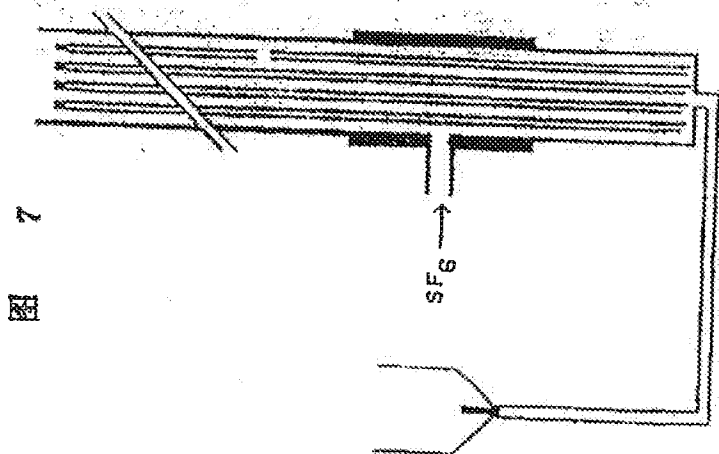


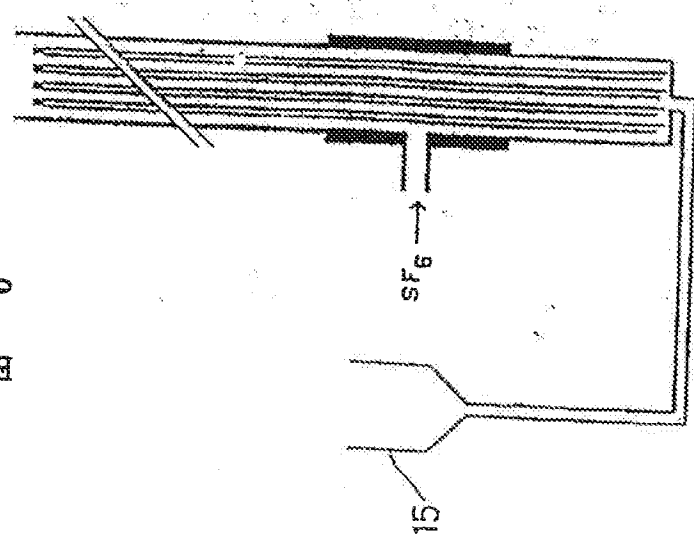
图 5





7

FIG



9

FIG

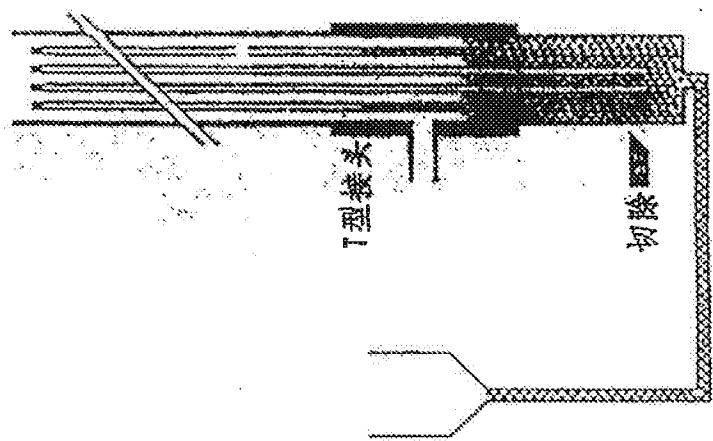


图 9

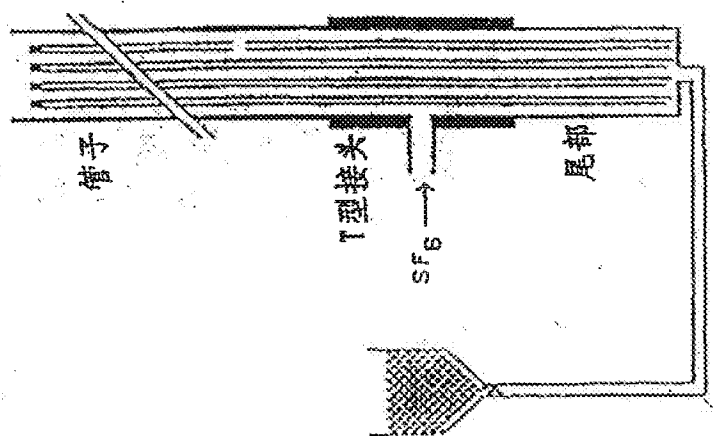


图 8

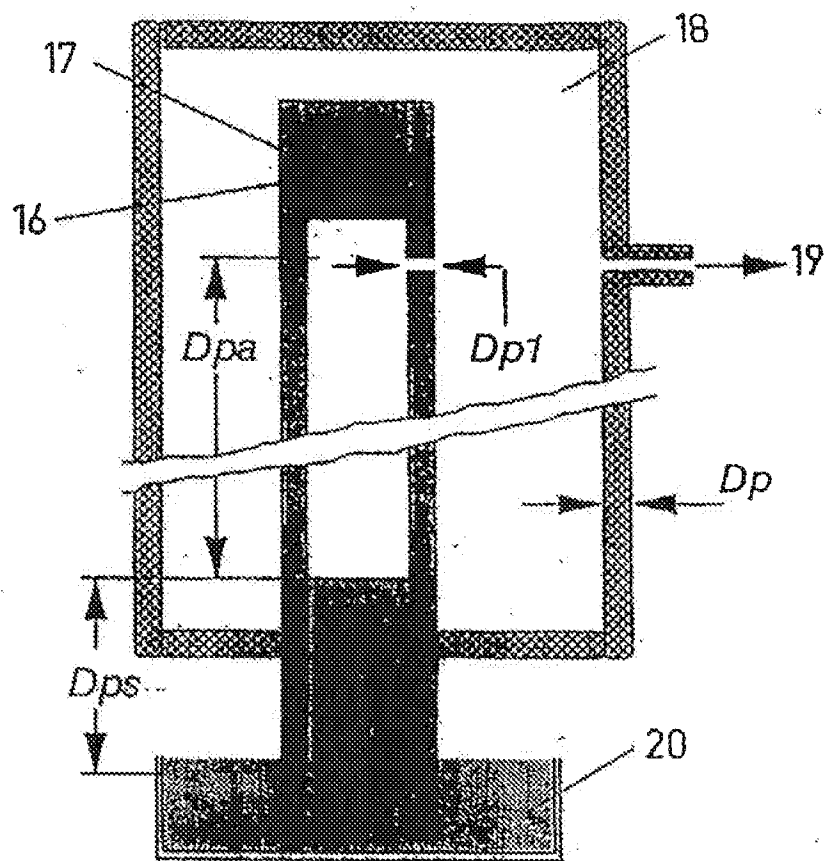


图 10